

基于光子禁带测量的二元溶液浓度检测方法的研究

阿不都热苏力 帕力哈提* 地力夏提

新疆大学物理科学与技术学院, 新疆 乌鲁木齐 830046

摘要 研究了二维光子晶体结构的带隙宽度随溶液浓度变化的关系,选择二维三角晶格光子晶体(Si和Ge)作为基底,在空气孔内填充待测质量摩尔浓度不同的混合二元溶液材料,得到了二元溶液填充的光子晶体在不同偏振模式下光子禁带结构。结果表明,溶液的质量摩尔浓度变化与晶体禁带宽度接近线性关系,而线性相关程度受背景介质柱材料的影响。不同背景基底晶格的光子晶体带隙宽度随溶液质量摩尔浓度的不同,其光子带隙(PBG)发生变化。这在溶液质量摩尔浓度检测应用方面有一定的指导作用。

关键词 光学器件;光子晶体;平面波展开法;二元溶液;浓度检测;光子能带结构

中图分类号 O737;O734

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.061603

Research on Binary Solution Concentration Detection Method Based on Photonic Band Gap Measurement

Abuduresuli Palihati Dilixiati

School of Physics and Technology, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China

Abstract By using the plane-wave expansion method and fast-Fourier transform method, two dimensional photonic band structure is calculated. A two-dimensional triangular lattice photonic crystal (Si and Ge) is used as the substrate, and the air hole is filled with different molality of mixed binary solution materials under test. The photonic band gap of the photonic crystal filled with binary solution under different polarization modes is obtained. Simulation experiments show that the molality of solution has a linear relationship with photonic band gap width, and that the linear correlation degree is affected by background medium column material. When the binary solution is used as the dielectric material of the air hole, the photonic band gap (PBG) changes with different molality of the solution quality. This research has a certain guiding function in solution mass fraction detection applications.

Key words optical devices; photonic crystal; plane wave expansion method; binary solutions; concentration detection; photonic band structure

OCIS codes 160.5298; 230.5298

1 引言

光子晶体是具有周期性介电常数的一种人工结构材料。根据折射率的重复结构循环的维数,分为一维、二维和三维光子晶体,其周期和光的波长在同一量级。光子晶体也被称为光子带隙材料,最大特点是能够禁止或允许特定的频率范围内电磁波的传播。这一特性使得光子晶体在控制电磁波方面具有优异的品质,从而在信息传输、自辐射的抑制、可调式光学滤波器、集成光学器件、发光二极管等方面获得了广泛的关注与应用^[1-3]。随着光子晶体光学性能的功能化,其在生物化学物质、原油炼制加工、各种临床及日常生活中的溶液浓度检测、毒剂及环境污染物、光学开关、金属探针等领域取得了广泛的应用,也为化学及生物传感器领域提供了新的检测原理和手段^[4]。已报道的光子晶体溶液浓度传感器在操控液体状态下工作的光学

收稿日期: 2014-12-29; 收到修改稿日期: 2015-01-20; 网络出版日期: 2015-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(11164030, 11465019)

作者简介: 阿不都热苏力(1961—),男,博士,教授,主要从事光子晶体的应用等方面的研究。

E-mail: abdrusul@sina.com

*通信联系人。 E-mail: fmejid@xju.edu.cn

芯片研究中具有重要的创新意义。本文以光子晶体的禁带理论为基础,利用对光子晶体平面波展开法而开发的 Matlab 语言程序计算了介电常数不同的二维光子晶体结构的禁带特性。给出了光子晶体带隙随待测二元溶液浓度的变化规律和百分浓度测量方面的模拟结果,为临床医学和生物化学中溶液浓度的检测提供了一种快速和简便的检测方法。

2 平面波展开法及模型结构

平面波展开法是研究光子晶体能带的一种简便计算方法之一,其应用布洛赫(Bloch)定理把相对介电常数和电磁场在倒格矢空间以平面波叠加的形式展开,将麦克斯韦方程组从实空间变换到离散傅里叶空间而化成一个本征方程,求解本征方程即可得到光子晶体能带及带隙。

在二维光子晶体中电磁场可以分解为横电模(TE)和横磁模(TM)。研究表明,由空气孔组成的三角晶格光子晶体在 TE 模式下的禁带较宽容易出现,所以采用 TE 模式。

如果光子晶体在无源空间,并且组成光子晶体介质为各向同性无耗无磁性介质,则电磁波在光子晶体中传播时电磁波的传播可由两个相互独立的方程来描述。只含电场或磁场的主方程式可表达为^[5-9]

$$\frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} \nabla \times [\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r})] = -\frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{E}(\mathbf{r}), \quad (1)$$

$$\nabla \times \frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) = \frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{H}(\mathbf{r}). \quad (2)$$

(1)式和(2)式分别代表电场强度和磁场强度的本征方程,式中 c 为真空中的光速, ω 为电磁波震荡频率, $\varepsilon(\mathbf{r})$ 为相对介电常数, $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ 、 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 分别为磁场和电场强度矢量,均为空间位移矢量 \mathbf{r} 的周期函数。对于二维三角晶格光子晶体(如图 1 所示),由于光子晶体的介电常数 $\varepsilon^{-1}(\mathbf{r})$ 、电矢量 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 和磁矢量 $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ 均为周期函数,根据 Bloch 定理,将其(1)式和(2)式进行平面波展开

$$\varepsilon^{-1}(\mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{G}} K(\mathbf{G}) \exp[i(\mathbf{G} \cdot \mathbf{r})], \quad (3)$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{G}} B(\mathbf{k} + \mathbf{G}) \exp[i(\mathbf{G} \cdot \mathbf{r})], \quad (4)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{G}} A(\mathbf{k} + \mathbf{G}) \exp[i(\mathbf{G} \cdot \mathbf{r})], \quad (5)$$

式中 \mathbf{G} 称为倒晶格向量,其定义为 $\mathbf{G}(h_1, h_2) = h_1 \mathbf{b}_1 + h_2 \mathbf{b}_2$, h_1 、 h_2 为整数, \mathbf{k} 是被限制于第一布里渊区的波矢, $K(\mathbf{G})$, $B(\mathbf{k} + \mathbf{G})$, $A(\mathbf{k} + \mathbf{G})$ 为傅里叶展开系数。虽然由(1)式及(2)式都可获得相同的能带结构,但由磁场为横波,在计算上少了一个维度,可以节省计算时所使用的内存与时间,因此本文选择以磁场为主的(2)式来进行能带计算。

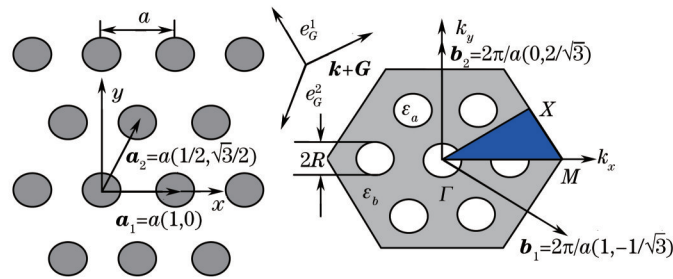


图 1 三角晶格结构和第一布里渊区

Fig.1 Triangular lattice and first Brillouin zone

将(3)式和(5)式代入(2)式整理后,可得 TE 偏振态下的特征方程

$$\sum_{\mathbf{G}} |\mathbf{k} + \mathbf{G}| |\mathbf{k} + \mathbf{G}'| \varepsilon^{-1}(\mathbf{G} - \mathbf{G}') \times \begin{bmatrix} e_c^2 \cdot e_c^2 & -e_c^2 \cdot e_c^1 \\ -e_c^1 \cdot e_c^2 & e_c^1 \cdot e_c^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_c^1 \\ A_c^2 \end{bmatrix} = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \begin{bmatrix} A_c^1 \\ A_c^2 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

由于在 TE 模式下 $A_c^2 = 0$, 因此,将其代入(7)式,可得

$$e_c^2 \cdot e_c^2 = [(k_y + G_y)(k_y + G'_y) + (k_x + G_x)(k_x + G'_x)] / (|\mathbf{k} + \mathbf{G}| |\mathbf{k} + \mathbf{G}'|) = (\mathbf{k} + \mathbf{G}) \cdot (\mathbf{k} + \mathbf{G}') / (|\mathbf{k} + \mathbf{G}| |\mathbf{k} + \mathbf{G}'|). \quad (8)$$

将(8)式改写成倒晶格数量为 N 的固有值方程

$$H_{e,G}^{\text{TE}} = \varepsilon^{-1}(\mathbf{G} - \mathbf{G}') \cdot (\mathbf{k} + \mathbf{G}) \cdot (\mathbf{k} + \mathbf{G}') \quad (9)$$

再根据麦克斯韦方程组中的两个旋度方程,可得到相关TE模下的亥姆霍兹方程

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\varepsilon^{-1}(x,y) \frac{\partial H_z(x,y)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\varepsilon^{-1}(x,y) \frac{\partial H_z(x,y)}{\partial y} \right] + \frac{\omega^2}{c^2} H_z(x,y) = 0 \quad (10)$$

将(3)式的傅里叶系数 $K(\mathbf{G})$, 对三角晶格展开,可以得到

$$K(\mathbf{G}) = \begin{cases} \frac{1}{\varepsilon_a} f + \frac{1}{\varepsilon_b} (1-f), & \mathbf{G} = \mathbf{0} \\ 2f \left(\frac{1}{\varepsilon_a} - \frac{1}{\varepsilon_b} \right) \frac{J_1(|\mathbf{G}|R)}{|\mathbf{G}|R}, & \mathbf{G} \neq \mathbf{0} \end{cases} \quad (11)$$

式中 J_1 为一阶贝塞尔函数, $f = 2\pi R^2 / (\sqrt{3}a^2)$ 为空气圆孔占整个晶胞的百分比,即三角晶格的填充因子。 ε_a 为待测液体的介电常数, ε_b 为背景材料的介电常数。 R 为介质柱截面半径, a 为晶格常数。将(11)式代入(9)式或(10)式,可得 $N \times N$ 列的矩阵本征方程。以本征方程求光子晶体的能带结构时,理论上只有对所有的倒晶格点求和,才能精确地求出能带结构。但在实际上,由于计算时间和计算机内存的限制,只能对有限个倒晶格点求和^[10-12]。

3 数值计算结果和分析

通过求解本征方程(9)式或(10)式,可以计算三角晶格光子晶体的带隙结构。由于光子晶体的带隙越宽,其性能越好,因此,测定质量摩尔浓度时尽量选带隙较宽和介电常数差较大的材料,从而有利于简便检测。这里的二维三角形晶格结构的空气孔型光子晶体设计如图1所示。模拟系统参量设计如下:首先分别选用两种高介电材料硅(Si, $\varepsilon_b=11.7$)和锗(Ge, $\varepsilon_b=16$)作为背景材料,然后均匀混合配制醋酸-丙酸(化学式: $\text{CH}_3\text{COOH}-\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$)、醋酸-丁酸(化学式: $\text{CH}_3\text{COOH}-\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2-\text{COOH}$)和醋酸-氯仿(化学式: $\text{CH}_3\text{COOH}-\text{CHCl}_3$)三种质量摩尔浓度为0~100mol/kg的二元溶液,且三种溶液的温度都控制在25℃。二元待测溶液的介电常数为 ε_a 。空气孔的半径为 $r/a=0.4 \mu\text{m}$,晶格常数为 $1 \mu\text{m}$ 。模数为 $n=10$,倒格子点数300。图2~图7分别为背景光学材料Si和Ge与填充圆柱形空气孔的醋酸-丙酸、醋酸-丁酸和醋酸-氯仿介质构成的二维三角晶格光子晶体的带隙结构图。纵坐标采用标度化的无量纲频率 $\omega a / (2\pi c) (a/\lambda)$,而横坐标采用标度化的Bloch波矢 \mathbf{k} 。由图2和图3中可以看出,由醋酸-丙酸(介电常数为 $\varepsilon_a=3.54$)和Si构成的三角晶格光子晶体中TE模有1个能隙, $G_{\text{ap}} = 0.234 \sim 0.269$, $\Delta = 13.8\%$;出现的带隙宽度比较宽,占全带隙的13.8%。而将Ge材料作为背景的三角晶格光子晶体中TE模也有1个能隙, $G_{\text{ap}} = 0.207 \sim 0.261$, $\Delta = 23.1\%$;出现的带隙宽度也比较宽,占全带隙的23.1%。

由图4~7可以看出,由醋酸-丁酸和醋酸-氯仿介质构成的二元溶液作为三角晶格光子晶体的空气孔介质材料,随着介电常数的不同,带隙宽度相应地变化。在25℃条件下,当醋酸-丙酸等溶液的质量摩尔浓度增大时,光子晶体的禁带宽度变小。当醋酸-丙酸质量摩尔浓度小于100mol/kg时,醋酸-丙酸的禁带宽度比其他两种溶液的禁带宽度宽,其次是醋酸-丁酸溶液,禁带宽度较小且变化较小的是醋酸-氯仿溶液。当

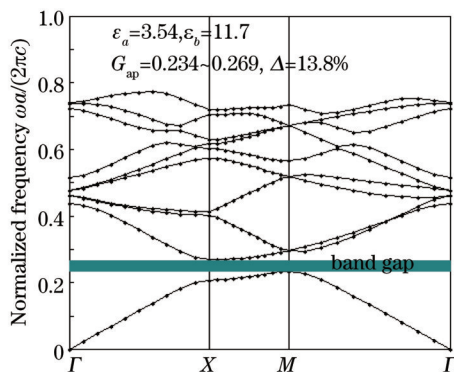


图2 三角晶格结构TE模带隙图(醋酸-丙酸,硅)

Fig.2 Dispersion diagram of triangular lattice, TE mode (acetic acid-propionic acid, Si)

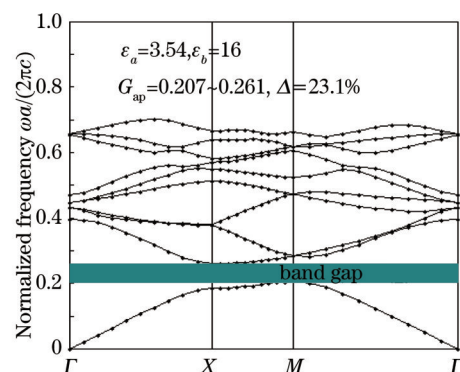


图3 三角晶格结构TE模带隙图(醋酸-丙酸,锗)

Fig.3 Dispersion diagram of triangular lattice, TE mode (acetic acid-propionic acid, Ge)

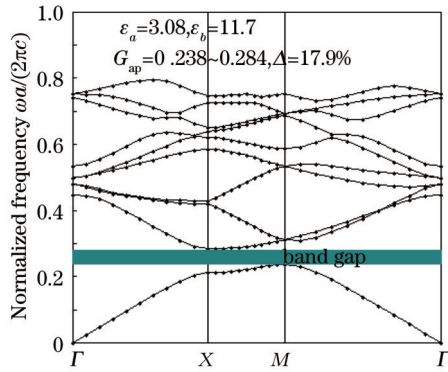


图4 三角晶格结构TE模带隙图(醋酸-丁酸,硅)

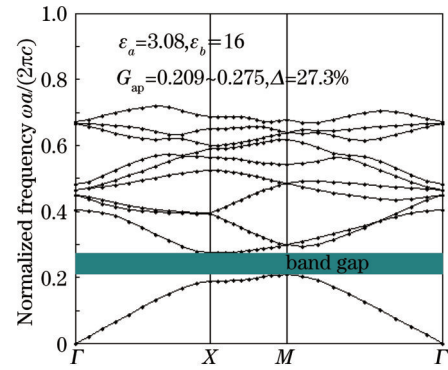
Fig.4 Dispersion diagram of triangular lattice,TE mode
(acetic acid-butyrac acid,Si)

图5 三角晶格结构TE模带隙图(醋酸-丁酸,锗)

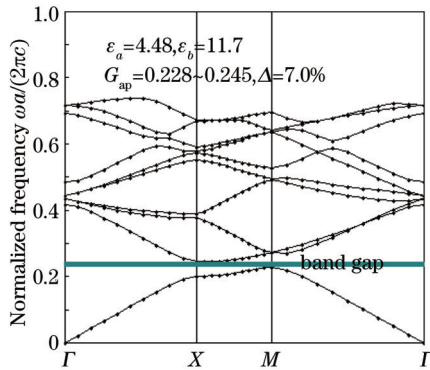
Fig.5 Dispersion diagram of triangular lattice,TE mode
(acetic acid-butyrac acid,Ge)

图6 三角晶格结构TE模带隙图(醋酸-氯仿,硅)

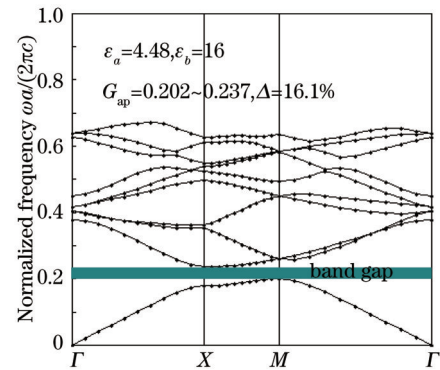
Fig.6 Dispersion diagram of triangular lattice,TE mode
(acetic acid-trichloromethane,Si)

图7 三角晶格结构TE模带隙图(醋酸-氯仿,锗)

Fig.7 Dispersion diagram of triangular lattice,TE mode
(acetic acid-trichloromethane,Ge)

三种溶液的质量摩尔浓度为 100%mol/kg 时,三者的禁带宽度相等,这是因为醋酸溶液充当光子晶体空气孔中的介质。

在不同质量摩尔浓度和介电常数情形下,对三角晶格光子禁带进行数值模拟,计算得到了表 1 所示的禁带宽度。

表 1 三种二元溶液对光子晶体带隙宽度的影响图(25 °C)

Table 1 Effect of solution on photonic crystal band gap width (25 °C)

| Binary solution | Temperature /°C | Percentage concentration | Dielectric ϵ_a constant | Band gap range (Si) | Band gap range (Ge) |
|----------------------------|-----------------|--------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|
| Acetic acid-propionic acid | 25 | 0 | 3.20 | 0.237~0.280 | 0.208~0.271 |
| | | 0.1953 | 3.54 | 0.234~0.269 | 0.207~0.261 |
| | | 0.3933 | 4.01 | 0.231~0.256 | 0.204~0.248 |
| | | 0.6002 | 4.60 | 0.228~0.242 | 0.202~0.235 |
| | | 0.8071 | 5.34 | 0.223~0.228 | 0.198~0.221 |
| | | 1.0 | 6.20 | 0 | 0.195~0.208 |
| Acetic acid-butyrac acid | 25 | 0 | 2.88 | 0.239~0.292 | 0.210~0.282 |
| | | 0.1964 | 3.08 | 0.238~0.284 | 0.209~0.275 |
| | | 0.3676 | 3.47 | 0.235~0.271 | 0.207~0.263 |
| | | 0.5909 | 4.19 | 0.230~0.252 | 0.203~0.244 |
| | | 0.8016 | 5.05 | 0.225~0.233 | 0.200~0.226 |
| | | 1.0 | 6.20 | 0 | 0.195~0.208 |

续表 1

| Binary solution | Temperature / $^{\circ}\text{C}$ | Percentage concentration | Dielectric ϵ_a constant | Band gap range (Si) | Band gap range (Ge) |
|------------------------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|
| Acetic acid-trichloromethane | 25 | 0 | 4.67 | 0.227~0.241 | 0.201~0.233 |
| | | 0.1854 | 4.48 | 0.228~0.245 | 0.202~0.237 |
| | | 0.3909 | 4.49 | 0.228~0.245 | 0.202~0.237 |
| | | 0.5799 | 4.79 | 0.226~0.238 | 0.201~0.231 |
| | | 0.7890 | 5.36 | 0.223~0.228 | 0.198~0.221 |
| | | 1.0 | 6.20 | 0 | 0.195~0.208 |

图8和图9是根据表1中的计算数据得到的二元溶液质量摩尔浓度与其相对禁带宽度的变化曲线图,图中点各代表一定质量摩尔浓度所对应的带隙值。可以看出,在一定温度下,二元溶液质量摩尔浓度与其光子带隙最大宽度约呈线性关系。当溶液的浓度逐渐增大时,其对应的光子带隙最大宽度随之变小,且呈一定的比例关系。通过上述的数值模拟可以得出:在温度一定时,二元混合溶液的质量摩尔浓度与光子晶体的带隙成近似线性关系,被测溶液质量摩尔浓度越大,产生的带隙越小。根据这个原理,可通过光子晶体的光强大小变化来测定溶液的质量摩尔浓度。

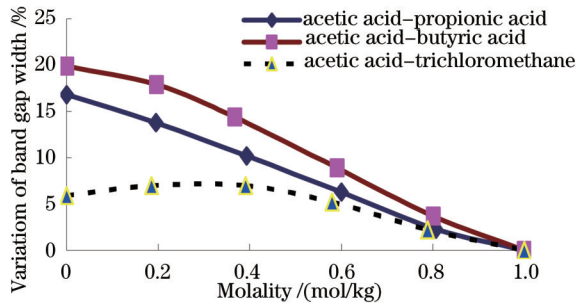


图8 光子带隙随三种溶液质量摩尔浓度的变化(Si背景)
Fig.8 Relationship between band gap with three kinds of solution molality (Si background)

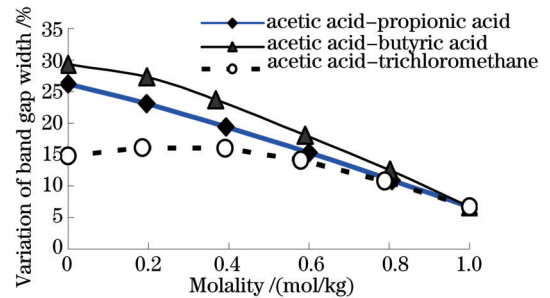


图9 光子带隙随三种溶液质量摩尔浓度的变化(Ge背景)
Fig.9 Relationship between band gap with three kinds of solution molality (Ge background)

图10~12是根据表1中的计算数据得到的二元溶液质量摩尔浓度与其光子带隙的拟合关系。可以看出在一定温度下,醋酸-丙酸和醋酸-丁酸溶液的质量摩尔浓度与其光子带隙约呈线性关系。溶液的质量摩尔浓度增大时,其对应的光子带隙最大宽度随之变小,且呈一定的比例关系,被测溶液浓度越大,禁带宽度变化越小。不同材料为背景的光子晶体传感器对溶液浓度变化具有不同的灵敏度,背景材料的选择可提高传感器对溶液浓度变化的响应度敏感,图10~12中拟合曲线的斜率即表征其敏感度。

由图10和图11可知,由待测溶液醋酸-丙酸和背景材料Si和Ge介质构成的三角晶格光子晶体来说,不同介电常数下带隙宽度也不同,以Ge材料为背景的光子晶体带隙宽度大于以Si为背景的光子晶体带隙宽度。其禁带宽度和质量摩尔浓度之间的线性拟合关系分别为

$$y = -19.629x + 26.734, \quad (12)$$

$$y = -23.227x + 31.045, \quad (13)$$

式中 x 为溶液质量摩尔浓度(mol/kg), y 为禁带宽度(μW)。线性拟合度为 $R^2=0.9972$ 和 $R^2=0.98.2$ 。在实际光子晶体探测器中,将探测到的随禁带宽度而变化的功率代入(12)式和(13)式中就可得到待测溶液的质量摩尔浓度。由图12可知,带隙宽度并不是依照比尔-朗伯定律随着浓度增加而线性增大,而是如仿真结果所示出现了非线性,并且测量结果带有随机性特征。这说明此时该溶液浓度已经超出了系统的线性测量上限,并且此时光子晶体带隙宽度较小,不适用于光子晶体器件的设计应用。对禁带宽度较大的Ge为背景的晶格结构,其禁带宽度与醋酸-氯化溶液浓度近似成线性关系,即

$$y = -8.4193x + 17.216. \quad (14)$$

线性拟合度 $R^2=0.7349$ 。

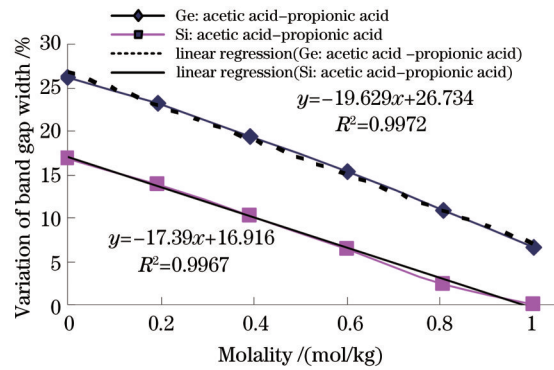


图 10 光子带隙随醋酸-丙酸溶液浓度变化的线性拟合曲线

Fig.10 Linear fit curve of relationship between band gap with acetic acid-propionic acid solution (Si and Ge)

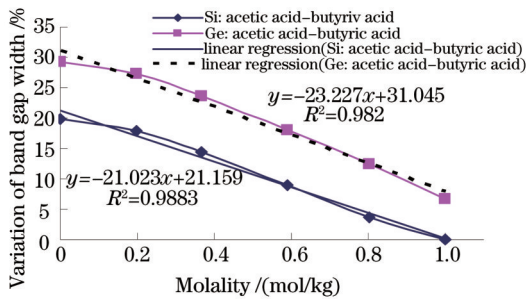


图 11 光子带隙随醋酸-丁酸溶液浓度变化的线性拟合曲线

Fig.11 Linear fit curve of relationship between band gap with acetic acid-butyric acid solution (Si and Ge)

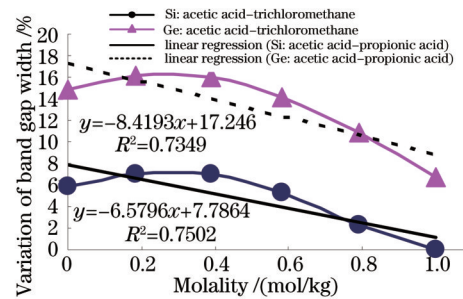


图 12 光子带隙随醋酸-氯仿溶液浓度变化的线性拟合曲线

Fig.12 Linear fit curve of relationship between band gap with acetic acid-trichloromethane solution (Si and Ge)

4 结 论

本文采用平面波展开法,数值计算了质量摩尔浓度由液体圆柱三角排列在 Si 和 Ge 基底材料构成的二维三角光子晶体的带隙结构,研究了带隙宽度随溶液填充质量摩尔浓度的变化行为。当二维三角晶格光子晶体的空气孔内填充溶液以后,将光子晶体的两侧用两个玻璃片封住,然后用波长 589 nm 的纳光灯照射光子晶体,穿过的光强被光电探测器测量。模拟结果表明,当采用温度为 25 ℃ 的醋酸-丙酸、醋酸-丁酸和醋酸-氯仿三种二元溶液作为介质柱材料时,随着溶液质量摩尔浓度的增大,光子晶体禁带宽度变小。相较于 Si 介质,以 Ge 介质为背景材料的三角晶格光子晶体中出现较大的禁带宽度,这有利于浓度检测。醋酸-丙酸和醋酸-丁酸溶液填充的光子禁带宽度与二元溶液的浓度变化接近线性关系,据此可拟合出两者之间的关系,应用于溶液浓度检测。研究结果为基于光子晶体禁带宽度的溶液浓度检测提供了参考依据。

参 考 文 献

- 1 Duan Tingrui, Li Haihua, Meng Zihui, *et al.*. Application of photonic crystals in chemical and bio-sensors[J]. *Hemistry*, 2009, (4): 298-305.
段廷蕊, 李海华, 孟子晖, 等. 光子晶体应用于化学及生物传感器的研究进展[J]. *化学通报*, 2009, (4): 298-305.
- 2 Pazilaiti Abudureyimu, Abuduresuli Abudurexiti. Simulation of two-dimensional photonic crystal band gap in concentration measurement[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6): 062302.
帕孜来提·阿卜杜热伊木, 阿不都热苏力·阿卜杜热西提. 二维光子晶体禁带理论在浓度测量上的模拟研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(6): 062302.
- 3 Zhou Fei, Fei Hongming, Chen Zihui, *et al.*. A high efficiency photonic crystal polarization beam splitter[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6): 062304.
周 飞, 费宏明, 陈智辉, 等. 一种高效光子晶体偏振光分束器[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(6): 062304.
- 4 G Palai, S K Tripathy. A novel method for measurement of concentration using two dimensional photonic crystal structures[J]. *Opt Commun*, 2012, 285(10-11): 2765-2768.

- 5 Yi Changshen, Zhang Peiqing, Dai Shixun, *et al.*. Research progress of large-mode area photonic crystal fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(10): 100001.
易昌申, 张培晴, 戴世勋, 等. 大模场光子晶体光纤研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(10): 100001.
- 6 Tang Bingshu, Tang Xiaozhou, Wang Gang. Transmission spectra of two dimensional cylindrical layered complex periodic photonic crystal[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2138-2142.
汤炳书, 汤晓舟, 王 刚. 二维圆柱层状复周期光子晶体的透射谱[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(11): 2138-2142.
- 7 Yuan Guifang, Han Lihong, Yu Zhongyuan, *et al.*. Two-dimensional photonic crystal band gap characteristics[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(10): 104214.
袁桂芳, 韩利红, 俞重远, 等. 二维光子晶体禁带特性研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(10): 104214.
- 8 Abudurexiti Abudouresuli, Pazilaiti, Mijiti Paerhati. Application of plane wave expansion method in measurement of mass fraction[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(1): 65-69.
阿不都热苏力, 帕孜来提, 帕尔哈提·米吉提. 平面波展开法在质量分数测量上的应用研究[J]. *激光技术*, 2014, 38(1): 65-69.
- 9 Zhou Xingping, Shu Jing, Lu Binjie, *et al.*. Two-wavelength division demultiplexer based on triangular lattice photonic crystal resonant cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0123001.
周兴平, 疏 静, 卢斌杰, 等. 基于三角晶格光子晶体谐振腔的双通道解波分复用器[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0123001.
- 10 Pendry J B, Mackinnon A. Calculation of photon dispersion relations[J]. *Phys Rev Lett*, 1992, 69(19): 2772-2775.
- 11 Plihal M, Shambrook A, Maradudin A A. Two-dimensional photonic band structures[J]. *Opt Commun*, 1991, 80(3-4): 199-204.
- 12 Liu Jinchuan, Jiang Wei, Li Shuping, *et al.*. Study of photonic band gap of 2D photonic crystals used in short-wavelength LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0623006.
刘金川, 姜 伟, 李书平, 等. 用于短波段发光二极管的二维光子晶体禁带研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0623006.

栏目编辑: 何卓铭